

SISTEMAS DE REFERÊNCIA EM ASTRONOMIA

Luiz Bernardo F. Clauzet

INTRODUÇÃO

Coube a Galileu (1564-1642), o mérito histórico de ter sido quem, pela primeira vez, mostrou a importância dos sistemas de referência na formulação das leis que regem a descrição dos fenômenos físicos. Em última análise, as leis físicas nada mais são que as relações mensuráveis entre grandezas físicas. Por outro lado, somente faz sentido falarmos em medida de uma grandeza física, se adotarmos um sistema de referência, relativamente ao qual ela poderá ser utilizada.

Ao descrevermos a trajetória de uma partícula, estamos supondo implicitamente um sistema de referência que permite especificar, a cada instante, a posição dessa partícula. Galileu já havia mostrado que a lei da inércia somente era verificada para certos sistemas de referência, hoje conhecidos como inerciais (ou absolutos). Contudo, para o estudo cinemático do universo, podemos utilizar um sistema de referência qualquer, adequadamente definido. Para passarmos de um sistema de referência a outro, alteramos os termos por intermédio dos quais exprimimos a cinemática do universo. A validade da descrição dos fenômenos no novo sistema se conserva. Hiparcos (190-125 a.C.) já havia utilizado, com grande êxito, um sistema de referência baseado em um catálogo estelar de aproximadamente 1000 estrelas. Durante a confecção desse catálogo descobriu, por exemplo, a precessão dos equinócios.

Durante séculos, até o aparecimento da dinâmica, a astronomia realizou apenas uma descrição cinemática do universo, com sistemas de referência, portanto, totalmente arbitrários. A contribuição genial de Newton (1642-1727) vem consolidar, de forma inquestionável, os alicerces da ciência moderna. Desde o momento em que foram enunciados, de forma geral e precisa, os postulados da mecânica clássica, essa teoria só conheceu a glória. Realizou a síntese dos movimentos dos astros e a precisão com que pode demonstrar a configuração planetária, durante séculos, legitimou essa doutrina que acabou servindo de base e de modelo a todos os ramos das ciências em que se pode introduzir medidas.

Com o aparecimento da dinâmica, a escolha dos sistemas de referência em astronomia deixa de ser arbitrária, surgindo mesmo um ramo da astronomia, a Astronomia Fundamental, cujo objetivo maior

L.B.F. Clauzet



Círculo Meridiano Askania Zeiss do Observatório Abrahão de Moraes – IAG/USP.

é a busca de um sistema inercial ou absoluto, que satisfaça os princípios fundamentais da dinâmica. A aproximação mais sensível para cumprir os objetivos da Astronomia Fundamental seria centrar um sistema de eixos dirigidos às estrelas, no centro de massa do Sistema Solar. Com origem no centro do Sol, essa construção já havia sido aventada por Copérnico (1473-1543), um século e meio antes de Newton publicar os “Principia”, fundamentando a dinâmica. Logicamente os propósitos de Copérnico eram apenas os de simplificar a descrição cinemática dos astros, mas sua intuição valeu até hoje o nome de “Problema de Copérnico”, à busca de eixos absolutos de

referência. Sem dúvida a simplificação da descrição cinemática encontrada por Copérnico se deveu ao fato de ser esse sistema uma ótima aproximação de um sistema absoluto. Contudo, desde que foi colocada em evidência a rotação da Galáxia, um tal sistema perderia o caráter absoluto em seu senso estrito, já que não mais seria lícito supor o centro de massas do Sistema Solar animado apenas de movimento retilíneo e uniforme.

A nova solução evidente seria transportar o sistema para o centro de massa da Galáxia com eixos solidários a objetos extragaláticos longínquos. Contudo, com o incremento sucessivo de precisão das observações, mais cedo ou mais tarde, os movimentos relativos entre esses objetos poderão ser significativos, evidenciando que o problema de Copérnico não comporta uma solução definitiva nem do ponto de vista matemático, nem do ponto de vista filosófico. Estaria comprometido o objetivo maior da Astronomia Fundamental? Felizmente não. Se, do ponto de vista teórico, o problema não comporta uma solução definitiva, a prática demonstra que a "astronomia se acomoda muito bem ao provisório" (Danjon, 1980). Como toda a ciência observacional, os resultados somente são obtidos com um grau de aproximação, fruto da precisão que o conhecimento permite em uma época. Assim, a Astronomia Fundamental procura materializar sistemas de referência inerciais, sem rotações residuais, assumindo implicitamente a mecânica newtoniana, com eventuais correções relativísticas^(a), que satisfaçam à precisão exigida em uma época.

A materialização de tal sistema é feita por intermédio de observações estelares e de astros do Sistema Solar, formando catálogos estelares. A compilação de diferentes catálogos, realizados adequadamente em diferentes épocas, vai permitir a determinação dos movimentos próprios das estrelas, que englobam, dentro da precisão atual, os efeitos da rotação galáctica. Esse elenco de estrelas, com po-

(a) Ao final do século passado e início deste, contradições entre relações de fenômenos materiais e eletromagnéticos levaram a dificuldades que pareciam insolúveis se não fossem modificados os próprios princípios da mecânica clássica. Assim, nasceu com Einstein (1879-1955) a teoria da relatividade, primeiro restrita depois generalizada. O fato talvez mais marcante dessas contradições, na astronomia, aparece com Leverrier (1811-1877), de cujas observações derivam diferenças sistemáticas entre o tempo obtido com observações da Lua e de Mercúrio. Esse tempo, parâmetro matemático das equações da mecânica, deveria ser o mesmo, observado com planetas diferentes, em um sistema absoluto. Esse desacordo somente foi explicado com a relatividade geral, mostrando um avanço no periélio de Mercúrio.

sições e movimentos próprios bem determinados, vai constituir um sistema fundamental de referência, melhor aproximação de um sistema absoluto. O conhecimento das constantes precessionais, permitindo o deslocamento desse sistema entre diferentes épocas, fornece a referência adequada para o estudo cinemático e dinâmico do universo. O sistema fundamental de referência em astronomia, adotado pela União Astronômica Internacional, é o FK₄ (Vierten Fundamental-Katalog,) proximamente FK₅. Esse sistema é uma evolução de sistemas fundamentais anteriores, que vêm sendo aperfeiçoados constantemente em diferentes observatórios. O sistema atual é formado por um elenco de aproximadamente 1500 estrelas brilhantes, com posições e movimentos próprios bem determinados. É um sistema equatorial, ou seja, tem como plano fundamental do sistema de referência o equador celeste e origem, sobre esse plano, no ponto vernal ou de Áries (ponto γ). Dois ângulos polares, ascensão reta (α) e declinação (δ) definem a posição de um astro nesse sistema ^(b)

INSTRUMENTAL UTILIZADO PARA A FORMAÇÃO DE CATÁLOGOS ESTELARES

O instrumento clássico utilizado na confecção de catálogos estelares é o círculo meridiano. Esse tipo de instrumento vem sendo usado regularmente, com aperfeiçoamentos instrumentais sucessivos, desde a metade do século XVIII. A foto 1 mostra o círculo meridiano Ascania-Zeiss, da Universidade de São Paulo, instalado no Observatório Abrahão de Moraes, em Valinhos. Esses instrumentos constam de uma luneta, com eixo de rotação no primeiro vertical, varrendo observacionalmente o plano meridiano. São os únicos instrumentos que permitem, com um único apontamento, a obtenção simultânea dos dois ângulos de posição, α e δ , que definem a posição do astro (Podobed, 1965).

Ainda concernente às observações meridianas, existem instrumentos de passagem que observam somente em ascensão reta e os círculos verticais, que observam somente em declinação. Na década de 50, aparecem os astrolábios Danjon, que observam com princí-

(b) Um artigo de revisão sobre sistemas fundamentais de referência, bastante claro e completo pode ser encontrado na referência Fricke (1972).

L.B.F. Clauzet



Astrolábio Danjon modificado do Observatório Abrahão de Moraes – IAG/USP.

pio diferente do dos círculos meridianos, mas que também podem derivar correções às posições estelares de catálogo (Débarbart e Guinot, 1970). Na foto 2 vemos o Astrolábio OPL-SOPELEM nº 39, também instalado no observatório da USP em Valinhos. Estes instrumentos, bastante compactos e praticamente sem constantes instrumentais a serem determinadas, têm exercido papel extremamente importante no aprimoramento do sistema fundamental de referência (Billaud e col. 1978; Clauzet 1983; Clauzet e Bene-

vides, 1985), atingindo hoje a melhor precisão dentre os instrumentos ópticos, visuais ou fotoelétricos (Billaud, 1983).

Ainda dentro do espectro óptico devemos ressaltar a grande contribuição dada pela fotografia astronômica no aprimoramento dos sistemas de referência (Van Altena, 1980). Radiointerferômetros têm sido utilizados na determinação das posições de rádio-estrelas com grande sucesso (Ryle e Eismore, 1973). Essa metodologia tem sido estendida a fontes extragaláticas Quasares e Galáxias com fraca emissão de rádio, utilizando interferometria de bases continentais (VLBI). A alta precisão alcançada por essas técnicas, aliada ao fato de que esses objetos, devido à grande distância em que se encontram, têm movimentos próprios relativos desprezíveis, tornam a metodologia altamente promissora no estabelecimento de sistemas fundamentais de referência (Florkowski e col. 1985). O problema da conexão dos sistemas "óptico-rádio", que dará origem à conexão dos sistemas de referência galácticos e extragalácticos, começa a ser delineado com as observações de rádio-estrelas (Débarbat e col. 1981; Clauzet e col. 1983, 1986).

Finalmente devemos ressaltar dois projetos espaciais astrométricos que deverão ser implementados nos próximos anos. O primeiro, Hipparcos^(c), pertence a um consórcio europeu e terá como missão a formação, com apenas dois anos de observações, de um catálogo estelar com aproximadamente 100.000 estrelas. A precisão teórica que se pode estimar mostra que essas determinações serão, ao menos dez vezes, melhores do que as atualmente conseguidas das observações ópticas feitas do solo (Kovalevsky, 1985). Um tal projeto coroado de êxito terá, sem dúvida alguma, um impacto fortíssimo em toda a astronomia, devendo provocar profundas mudanças em nosso conhecimento atual de toda a cinemática e dinâmica estelar. O segundo projeto, "Space Telescope", é norte-americano e basicamente dirigido à astrofísica. Ele possibilitará contudo experimentações importantes para a astronomia fundamental, mormente na tentativa de conexão dos sistemas de referência galácticos e extragalácticos com as observações de pequenos planetas (Duncombe e Hemenway, 1983).

(c) HIPPARCOS é um acrônimo de High Precision PARallax COLlecting Satellite, em homenagem ao astrônomo Hiparcos de Nicea, citado anteriormente como o primeiro a estabelecer um catálogo de posições estelares.

AS OBSERVAÇÕES ESTELARES E CATÁLOGOS ASSOCIADOS

Existem diferentes metodologias observacionais para a obtenção de catálogos estelares. Todas elas podem ser classificadas em um dos três grupos: observações diferenciais ou relativas, observações absolutas e observações fundamentais (Fricke, 1981, 1982a). Esses tipos de observações geram, conseqüentemente, os correspondentes tipos de catálogos estelares. Daremos os princípios de cada uma dessas observações para o círculo meridiano, que é o instrumento clássico para a derivação de catálogos estelares. Logicamente, como já dissemos, alguns instrumentos usam princípios um pouco diferentes, mas os do círculo meridiano são suficientes para a visão qualitativa que pretendemos.

a) Observações diferenciais ou relativas

São as observações realizadas relativamente a um catálogo estelar, previamente escolhido como padrão. Têm objetivo de aprimorar as posições individuais das estrelas do sistema de referência utilizado como padrão ou, ainda, de determinar novas posições e movimentos próprios de outras estrelas em relação a esse mesmo sistema.

A culminação superior^(d) de uma estrela cuja posição queremos determinar fornece:

$$\begin{aligned} a &= \theta' + \mu + \xi \\ \delta &= M + \phi + \eta \end{aligned} \quad (1)$$

onde θ é o instante sideral registrado da passagem, μ a correção do relógio, M a medida feita no círculo graduado, ϕ a latitude instantânea e ξ e δ somas de termos corretivos que incluem erros de orientação do instrumento, erros de graduação, refração, flexão, etc. Após essa observação ter sido completada, observamos uma estrela do sistema de referência padrão adotado:

$$\begin{aligned} a_{\text{ref}} &= \theta' + \mu + \xi \\ \delta_{\text{ref}} &= M' + \phi + \eta \end{aligned} \quad (2)$$

(d) Culminação superior é a passagem da estrela pelo meridiano local quando o ângulo horário é nulo, ou seja, a estrela está cruzando o meridiano de leste para oeste. Algumas estrelas são circumpolares, isto é, podem ter sua culminação inferior visível, com ângulo horário de 12 horas. Nesse caso o movimento relativo se faz de oeste para leste. Logicamente o número de estrelas circumpolares depende da latitude do observador.

Supondo suficientemente pequeno o intervalo de tempo entre as duas observações, a fim de que não tenham variado μ , ξ , ϕ e η de forma significativa, a diferença entre o sistema (1) e (2) fornece:

$$\begin{aligned} a - a_{\text{ref}} &= \theta - \theta' = \Delta a & a &= a_{\text{ref}} + \Delta a \\ \delta - \delta_{\text{ref}} &= M - M' = \Delta \delta & \delta &= \delta_{\text{ref}} + \Delta \delta \end{aligned} \quad (3)$$

Obtemos portanto as coordenadas a e δ da estrela, relativamente ao catálogo de referência previamente adotado. O novo catálogo, confeccionado dessa forma, conterà assim todos os eventuais erros sistemáticos do sistema padrão adotado. Na prática de construção desses catálogos diferenciais, utilizamos o sistema de equações (1), com valores médios de μ , ξ , ϕ e η previamente obtidos com observações de estrelas de referência, pertencentes a sistemas fundamentais, como o FK₄, por exemplo.

b) Observações absolutas

São as observações feitas sem conhecimentos prévio das coordenadas estelares. As somáticas ξ , η e a latitude ϕ devem ser calculadas de forma independente das observações estelares. Parte dessas correções é calculada instrumentalmente e parte utilizando-se das observações de duas culminações de estrelas circumpolares (Zverev, 1970) ou de arcos da trajetória de uma "Polaríssima"^(e) (Teixeira e Benevides, 1986). O acompanhamento da variação de latitude é feito por intermédio de dados fornecidos pelo "Bureau International de l'Hèure" (BIH), situado na França. Padrões de freqüência de ótima qualidade devem ser utilizados, e recepções diárias de sinais horários mantêm o conhecimento adequado de uma aproximação μ_0 à correção do relógio. Nessa classe de observações recebem especial atenção o cálculo da flexão e da refração (Atkinson, 1967). Os erros instrumentais são objeto de cuidadosa investigação, principalmente os erros de graduação dos círculos de declinação (Benevides-Soares e Boczko, 1981; Fournier e col. 1983).

Os catálogos assim formados são baseados no observador e ins-

(e) Uma estrela é considerada "polaríssima" quando estiver situada à pequena distância angular do polo celeste. Nessas condições seu movimento relativo, devido à rotação da Terra, fica contido no campo de visão do instrumento, possibilitando sua observação a qualquer hora da noite.

trumento, criando um sistema instrumental para uma época média de observação.

Dois catálogos obtidos dessa forma, em épocas diferentes, possibilitam a determinação dos movimentos próprios das estrelas.

c) Observações fundamentais

Esta classe de observações oferece extrema dificuldade, pois além da confecção do catálogo feito de forma absoluta, procura determinar o plano fundamental do sistema de referência, bem como o equinócio dinâmico do mesmo (intersecção do plano da eclíptica com o equador celeste) (Fricke, 1982b, c). Para isso são necessárias observações de planetas, asteróides e Sol, além das observações estelares, o que implica em um trabalho árduo de observações sistemáticas diurnas e noturnas. Em princípio, a ascensão reta do Sol (a_{\odot}) e sua declinação (δ_{\odot}) fornecem respectivamente a origem (ponto γ) e o plano fundamental do sistema (equador celeste).

A compilação de diferentes catálogos absolutos, com plano fundamental e origem determinados para uma zona de declinação, vai formar um sistema fundamental de referência, ótima aproximação de um sistema inercial para a época média das observações.

CONCLUSÃO

Um sistema fundamental de referência em astronomia é fruto de um trabalho coletivo de diferentes observatórios, que se dedicam à confecção de catálogos estelares. O futuro FK₅, por exemplo, em compilação final em Heidelberg (Alemanha), nasceu de uma resolução da União Astronômica Internacional (IAU), em Grenoble (França), em 1976. Esta decisão, por sua vez, foi reflexo das necessidades da comunidade em incrementar a precisão e o número de estrelas deste sistema. Catálogos e observações do Sol, planetas e asteróides de 50 observatórios, em 25 países, estão sendo utilizados para o aperfeiçoamento do FK₄ e sua extensão a estrelas mais fracas (Fricke, 1985).

Um futuro de profundas alterações no estado atual de nossos

sistemas fundamentais pode ser esperado com a conexão entre sistemas galácticos e extragalácticos e com o sucesso dos projetos espaciais.

O Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico da USP conta com um grupo de Astronomia Fundamental que mantém intensa atividade, do ponto de vista teórico e experimental, concernente aos sistemas de referência em astronomia.

REFERÊNCIAS

- ATKINSON, R. d'E.: 1967, *Astron. J.* **72**, 5
- BENEVIDES-SOARES, P.; BOCZKO, R.: 1981, *Astron. Astrophys.* **96**, 127
- BILLAUD, G.: 1983, *5^{ème} Colloque GS5*, Paris, 239-244: Ed. Y. Requième
- BILLAUD, G.; GUALLINO, G.; VIGOUROUX, G.: 1978, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **31**, 159
- CLAUZET L. B. F.: 1983, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **52**, 403
- CLAUZET L. B. F.; BENEVIDES-SOARES, P.: 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **61**, 83
- CLAUZET, L. B. F.; ATALLA, R.; DÉBARBAT, S.: 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **63**, 204
- CLAUZET L. B. F.; DÉBARBAT, S.; CHOLLET, F.: 1986, *Astron. Astrophys.* **167**, 387
- DANJON, A.: 1980, **Astronomie Générale**, Seconde Edition — Librairie Scientifique et Technique. Ed. Albert Blanchard, Paris
- DÉBARBAT, S.; GUINOT, B.: 1970, **La Méthode des hauteurs égales en astronomie**. Gordon and Breach Ed., Paris
- DÉBARBAT, S.; CHOLLET, F.; CLAUZET, L. B. F.; FEISSEL, M.; LAM, S. K.; TEXIER, P.; THOMAS, M.; VANHOLLEBEKE, J.: 1981, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **44**, 189
- DUNCOMBE, R. L.; HEMENWAY P. D.: 1983, in **The Motion of Planets and Natural and Artificial Satellites**. Ed. S. Ferraz-Mello e Nacozy, IAG-USP, São Paulo
- F LORKOWSKI, D. R.; JOHNASON, K. J.; WADE, C. M.; de WEGT C.: 1985, *Astron. J.* **90**, 2381
- FOURNIER, J. M.; RAPAPORT, M.; REQUIÈME, Y.: 1983, *5^{ème} Colloque GS5*, Paris, 251-57. Ed. Y. Requième
- FRICKE, W.: 1972, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **10**, 101
- FRICKE, W.: 1981, in **Ref. Coord. Systems for Earth Dynamics**. Eds. E. M. Gaposchkin and B. Kolaczek — D. Reidel Publ.
- FRICKE, W.: 1982^a, ESA SP-177, *Proc. Int. Coll. at Strasbourg.* **43**
- FRICKE, W.: 1982^b, *Astron. Astrophys.* **107**, L13
- FRICKE, W.: 1982^c, *Astron. J.* **87**, 1338
- KOVALEVSKY, J.: 1985, **Sec. Fund. Astron. by Space Techniques Thinkshop**, Marseille, France, Ed. J. Kovalevsky

- PODOBED, V. V.: 1965, **Fundamental Astrometry**. The Univers. of Chicago Press
- TEIXEIRA, R.; BENEVIDES-SOARES, P.: 1986, *Astron. Astrophys.* **165**, 251
- VAN ALTENA, W. F.: 1983, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **21**, 131
- ZVEREV, M. S.: 1970, **Fundamental Astrometry**. U. S. Dep. of Comm. of Techn. Serv. Joint Publ. Research Serv.; U. S. Naval Observatory, Washington, D. C., USA

FICHA CATALOGRÁFICA

CLAUZET, Luiz Bernardo F. *Sistemas de referência em Astronomia*. **Revista da Universidade de São Paulo**. São Paulo, (4): p. 107 – 118, março de 1987.